

## 共役点における地磁気変動の統計的特性

橋本久美子<sup>1</sup>・佐藤夏雄<sup>2</sup>・楠瀬昌彦<sup>3</sup>

### Statistical Study on the Conjugacy of Geomagnetic Field Variations

Kumiko HASHIMOTO<sup>1</sup>, Natsuo SATO<sup>2</sup> and Masahiko KUSUNOSE<sup>3</sup>

**Abstract :** The diurnal and seasonal dependence of the conjugacy of geomagnetic variations associated with the auroral electrojet is investigated and their dependence on ionospheric conductivity (due to solar EUV and auroral particle precipitations) is examined. We analyze the fluxgate magnetometer data from two magnetic conjugate stations at Syowa in Antarctica and at Aedey in Iceland, during the period from September 1989 to September 1990. Here, a magnitude of geomagnetic variation is defined as a deviation from quiet time geomagnetic elements for each month. We further examined a ratio of the magnitudes of the geomagnetic variations between two stations ( $\Delta H_{\text{SYOWA}} / \Delta H_{\text{AEDEY}}$ ).

Principal characteristics of the magnitude ratio between two conjugate observatories include the following: When the sense of magnetic variations of  $H$  component is positive (northward), the magnitude in the summer hemisphere is about three times larger than that in the winter hemisphere during 1300–2000 UT, and the magnitude ratio becomes largest around 1800 UT in the northern summer. Almost the same magnitude of geomagnetic variations at the two observatories appeared at around 1800 UT in February and October.

On the other hand, for negative variation (southward), a similar seasonal change can be seen only under low magnetic activity conditions. The magnitude ratio for the negative variation is always smaller than that for the positive one. The ratios are equal around 0600 UT in April and August.

The magnitude of geomagnetic variation showed dependence on the geomagnetic activity level. Generally, in all seasons, the magnitude at Syowa shows to be larger than that at Aedey relatively for both positive and negative variations with geomagnetic activity level.

These results are consistent with the diurnal and seasonal change of the ionospheres depending on the sunlit conditions. We further examined the effects of ionization made by auroral particle precipitations.

**要旨:** 昭和基地－アエデ(アイスランド)の地磁気共役点において同時に観測された fluxgate 磁力計による地磁気の  $H$  (南北)成分を用いて、オーロラジェット電流の東西成分の共役性について統計的な解析を行った。本研究では各月ごとに、地磁気の静穏時の値からの変差を地磁気変動量と定義している。1989年9月～1990

<sup>1</sup> 九州大学理学部物理学科. Department of Physics, Kyushu University, 6-1, Hakozaki 6-chome, Higashi-ku, Fukuoka 812.

<sup>2</sup> 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

<sup>3</sup> 高知大学理学部情報学科. Department of Information Science, Kochi University, 5-1, Akebono-cho 2-chome, Kochi 780.

年9月の13カ月間のデータを用いて、両観測点における地磁気変動量の共役性の日変化、季節変化などの特性が得られた。

解析の結果、午後から夜にかけてみられる  $H$  成分の北向きの変動(東向きオーロラジェット電流)は、夏半球側が冬半球側より3~5倍ほど大きく、アエデが夏季の1800 UT 頃に最も差が大きくなる。また、2月と10月に変動量は等しくなる。一方、夜中から朝にかけてみられる  $H$  成分の南向きの変動(西向きオーロラジェット電流)は静穏時には夏半球側が冬半球側より1.5~3倍ほど大きく、4月と8月に変動量が等しくなる。共役点におけるこれらの非共役な現象は、両観測点の地理座標の差異による日照条件の違いとよく一致する。また、磁気活動度が高くなるとともに、北向きの変動の場合も南向きの変動の場合もともに、昭和基地の地磁気変動量が相対的にアエデより大きくなる傾向がある。このことは両観測点におけるオーロラ粒子の降り込みによる電離層の電離効率の違いと同じ傾向にある。

## 1. はじめに

オーロラ活動に伴って起こる極域の地磁気の擾乱現象は、オーロラ帯に沿って流れるオーロラジェット電流によって起こされている。またオーロラ活動が静穏の時でも、磁気圏内の電場が極域の電離圏に伝わるため、 $Sp$  電流系が存在する。これらの電離層電流が作る磁場が地上で観測される。

南極の昭和基地と北極域のアイスランドのアエデにおいて、fluxgate 磁力計による地磁気三成分の連続観測が行われている。この二つの観測点は、お互いに一本の磁力線によって結ばれている地磁気共役点付近に位置する。オーロラ粒子(荷電粒子)や電磁波動現象は基本的には磁力線に沿う特性を持っている。従って、共役点では互いに似た現象が観測されると期待される。これを共役性という。しかし実際には、磁気圏-電離圏内の種々の条件の違いにより、共役点で同一の現象が起こらない場合も多い。そしてその非共役な現象を詳細に研究することにより、逆に共役点を結んでいる磁力線に沿って存在する磁気圏-電離圏の状態を知る手がかりになり得る。特に昭和基地-アイスランド地磁気共役点はオーロラ帯に位置するため、オーロラジェット電流の特性を知るのに好条件である。

本研究の第一の目的は、昭和基地-アイスランド地磁気共役点で同時に観測された地磁気変動を用いて、オーロラジェット電流の共役性の統計的特性(季節変化、日変化)を明らかにすることである。そして第二に地磁気変動にみられる非共役性から、両観測点における日照条件の差異や、地磁気活動度に伴うオーロラ粒子の降り込みによって生ずる電離層の電気伝導度がオーロラジェット電流に及ぼす影響を明らかにすることである。

オーロラ帯付近における地磁気変動(湾型変動)の共役性に関する研究は、NAGATA and KOKUBUN (1960), WESCOTT (1961), NAGATA *et al.* (1966), MENG and AKASOFU (1968) やその他の多くの研究者たちによって行われてきた。午後にみられる  $H$  成分の positive bay (正の湾型変動)の共役性には顕著な季節変化がみられ、夏半球における変動量が冬半球より大きくなる(WESCOTT and MATHER, 1965)。MENG and AKASOFU (1968) は、地磁気共役点における positive bay のピークの変動量の比は午後で大きく、夜中にかけて小さくなっていく

という MLT 依存性を示した。Negative bay の場合は positive bay に比べ、変動量が小さい、すなわち季節変化が小さい。

極域の電離層電流系には二つの成分 ( $S_q$  電流, オーロラジェット電流) が存在するため、地磁気変動量の比較をする際に問題となるのは、地磁気変動量の基準値の決め方である。KAMIDE and FUKUSHIMA (1972) は地磁気の変動量の基準値について、a) 午後と朝方のレベルを結ぶラインを基準線とした場合 (MENG and AKASOFU, 1968) と、b) bay-type の変動が始まる直前の値を基準とした場合の二通りの方法を用いて、positive bay の共役性の比較を行っている。そして positive bay には二つの成分があることを示している。a) の方法では、基準値を引き去った後の変動量には  $S_q$  電流系による成分が含まれている。そして  $S_q$  電流系は季節変化がある (NAGATA and KOKUBUN, 1962)。そのためこの結果ではオーロラジェット電流と  $S_q$  電流系の各成分の季節変化が分離されていなかったと考えられる。また b) の方法による解析においては、positive bay のピークの変動量の比較が行われているが、共役性の MLT 依存性などの詳細は得られていなかった。

地磁気変動にみられる非共役な現象は、主に日照の差異によって電離層の電気伝導率が冬季より夏季に大きくなるためであると考えられている。しかし日照による電離層の電気伝導率の変化が電離層電流系に及ぼす影響をより定量的に知るためには、これまでの研究で得られた共役性の MLT 特性、季節特性では定性的であったため不十分であった。

本論文では、統計的な解析のために各月の最も静穏な日の日変化のラインを基準線とし、その値からの変差を地磁気変動量と定義している。これによって、 $S_q$  の季節変化の成分は除かれていると考えられる。今回、昭和基地 (南極)-アエデ (アイスランド) 地磁気共役点において観測された、1989 年 9 月~1990 年 9 月の 13 カ月間のデジタルデータの解析を行った。そして今まで十分でなかった、オーロラジェット電流の共役性の日変化、年変化などの特性をより定量的に明らかにすることができた。解析により得られた地磁気変動の共役性の特性は、南北両半球の観測点における日照条件の差異に非常によく一致している。

## 2. 観測点とデータ

### 2.1. 観測点

南極の昭和基地 (以下 Syowa と記述) とアイスランドの三つの観測点 (Husafell, Tjörnes, Isafjörður 後に Aedey) はお互いに地磁気共役点付近に位置する。これらの観測点の地理座標および不変地磁気座標を表 1 に示す。Syowa とアイスランドの観測点はオーロラ帯の真下に位置しているため、オーロラジェット電流の特性を知るのに好条件である。

Syowa とアイスランドの観測点では地理的、及び地磁氣的物理量に表 1 のような差異がある。これらは、磁軸が地軸に対して傾いていることや磁場に非双極子成分が含まれているためである。これらの条件の違いは結果として、主に共役点上の電離層の電気伝導度に違い

**表 1** 南極の昭和基地とアイスランドの 3 観測点の地理座標, 地磁気座標 (IGRF 1985 model), 及び固有磁場強度.

*Table 1. Geographic and geomagnetic coordinates, calculated by the IGRF 1985 model, and total field (F) at Syowa Station in Antarctica and three stations in Iceland.*

観 測 点	地 理		不 変 磁 気		磁場強度 (nT) (23 March 1990)
	緯 度	経 度	緯 度	経 度	
昭和基地	- 69.00	39.58	67.78	68.28	44059
Husafell	66.67	338.97	66.02	68.88	
Tjörnes	66.20	342.88	66.97	73.27	51619
Aedey	66.09	337.35	64.44	68.55	(Leirvogur における値)

を生じさせる.

また, Syowa とアイスランドの観測点では, 磁気地方時 (MLT) は世界時 (UT) とのずれが 10 分以内で, ほぼ世界時と等しいとみなせる. したがって, 本論文では特にことわりのない限り時刻を UT で表す.

## 2.2. データベース

Fluxgate 磁力計で観測された磁場の値は絶対量ではないので, 基準となるベースライン (ベースラインについては 2.3 章で述べる) を決め, それを差し引くことで変動量にしなければならない. さらに各観測点の観測器の換算値による補正を行い物理量 (nT) に直す. また, Syowa のデータは 1 秒サンプルであるが, アイスランドのデータは 2 秒サンプルになっているためデータ数を揃えなければならない. 本研究の目的は, 3~6 時間ほど続く長周期の地磁気変動現象の変動量を定量的に南北比較しようとするものであるため, 本解析の場合, 秒単位の短周期変動は無視することにした. そこで長周期変動のなかにみられる短周期変動のタイムスケールを考慮して, 10 分間平均のデータを用いるのが適当であると考えた. 以後本解析においては, この 10 分平均データを解析の基本データベースとし, これを基に, 必要に応じて 1 時間平均など施して用いている.

## 2.3. ベースライン

Fluxgate 磁力計のデータを用いて地磁気変動量の比較を行う際には, 変動の基準となる値を決定することが重要となる. 磁気圏が静かな状態の時でも, 極域電離層電流には  $S_q$  電流系が存在する. そのため静穏日にも地上で観測される地磁気には日変化がある. この静穏時における地磁気の日変化のラインを基準線とし, この値からの変差を地磁気変動量と定義することにする. 静穏時の地磁気の値は, 季節によっても変化する. そこで本解析ではひと月ごとにベースラインを決めている. これによって  $S_q$  電流系の成分の季節変化の影響を除くことができる. 本論文では統計的解析を行う目的から, 個々の bay-type の変動について基準を決める方法は用いなかった.

具体的には以下のように基準線を決定している。ひと月の磁氣的に最も静かな日の1日の $\Sigma K$ 指数が0~4である場合には、その1日の地磁気の値をそのままベースラインとする。  $\Sigma K$ 指数がそれほど小さい日がない月については、 $\Sigma K$ 指数が~15程度の数日について各時間帯の $K$ 指数が0, 1の日の平均をとり、それをその時刻のベースラインの値とする。そしてそれを10分間平均したものをベースラインとして使用する。

#### 2.4. アイスランド観測点のデータの問題点

アイスランドの観測点で観測された fluxgate 磁力計のデータには、超高層現象による自然の磁氣的な現象とは無関係と思われるドリフトの成分がみられた。 Husafell, Tjörnes, Isafjördur では静穏時のレベルが数日間で非常に大きく変化することがあり、特に Husafell では  $H$  成分がひと月に 150 nT ほど変化する月もあった。

このドリフトの原因として考えられることは、磁力計の温度特性によるレベルの変化と、磁力計を設置している地盤が傾くことにより、磁力計そのものの姿勢が変化することである。地盤が傾くというのは、Husafell, Tjörnes, Isafjördur では地盤が凍土であるため、その上に基礎を築いて設置されている観測器は水平を保っていない可能性がある。レイキャビクにおける絶対磁場の観測を参考にして、これらの観測点における磁場の三成分を合成して全磁力の変化を調べてみた。しかし全磁力にはこのようなドリフトの成分はみられなかった。そして、Isafjördur の観測所は1989年8月に Aedey に移転されたが、この新しい観測点では前述のようなドリフトが生じていない。これは Aedey では磁力計センサーを岩盤の上に設置しているためであると考えられる。また、Tjörnes, Aedey と Syowa の磁力計は島津製作所製の同じ機種である。しかし Tjörnes 以外の観測点では問題がないことから、温度特性の影響は本研究の目的では無視できる程度に小さいと考えてよい。以上のことから、このドリフトの成分は主に観測器を設置している地盤の変化によるものであると考えられる。

アイスランドで観測された地磁気の三成分について1984~1990年にわたって、このベースラインのレベルのドリフトを調べてみた。しかし、Aedey を除いた観測点ではドリフトが大きく、しかもその変化に傾向といえるものは認められなかった。そこで本解析において、最も重要である基準のベースラインを決めることが困難であると判断し、今回の解析では Husafell, Tjörnes と Isafjördur (~1989年8月)のデータを使用するのをあきらめることにした。

以上のことから、本解析では Syowa と Aedey のデータを使用することにした。期間は Aedey で観測が開始されたのが1989年8月20日からであることと、Syowa のデータはこの解析を行う時点では1990年10月までしか国立極地研究所になかったことから、1989年9月から1990年9月までの13カ月間について行っている。

### 3. 解 析

本解析では Syowa と Aedey で観測された fluxgate 磁力計の  $H$  成分のデータを用いた。期間は 1989 年 9 月～1990 年 9 月の 13 カ月間である。以下、Syowa と Aedey における変動量を各々  $\Delta H_{SY}$ ,  $\Delta H_{AE}$  と表す。また、断りのない限り春期、夏期、秋期、冬期というのは北半球側の季節にあわせる。

#### 3.1. 磁気変動量比の日変化とその季節変化

春、秋期の典型的な地磁気変動の  $H$  成分の日変化を図 1a, b に示す。Syowa の  $\Sigma K$  指数

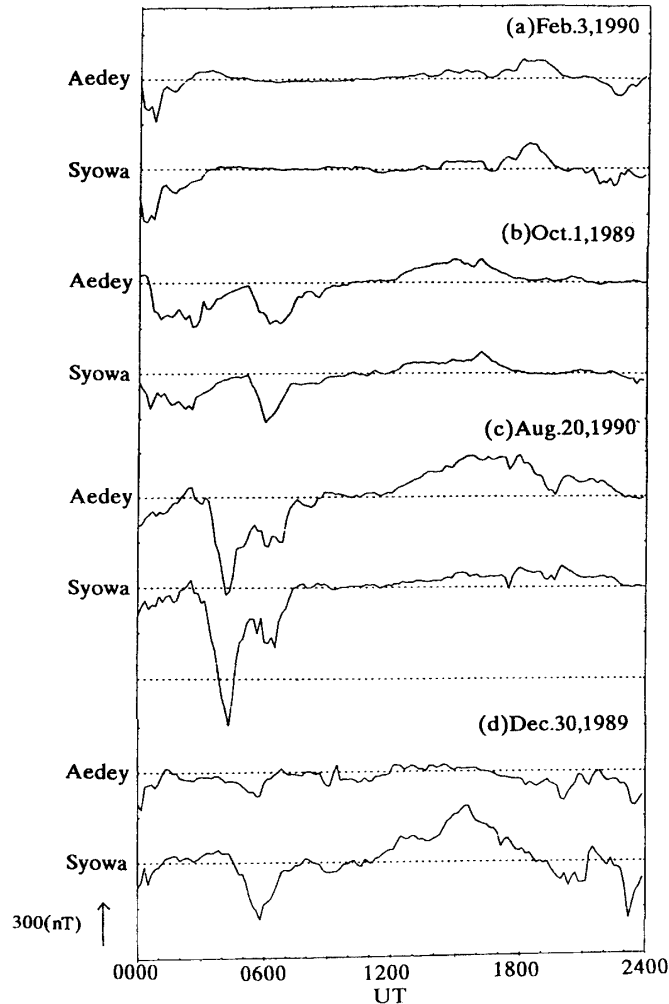


図 1 1989 年 10 月 1 日、12 月 30 日と 1990 年 2 月 3 日、8 月 20 日に Syowa と Aedey において観測された地磁気の  $H$  成分。各季節における典型的な日変化の例である。点線は各月のベースラインを表す。

Fig. 1. Typical examples of daily magnetic field variations observed at Syowa and Aedey on October 1, December 30, 1989, February 3 and August 20, 1990. The dotted line in each panel indicates the base line for each month.

は1990年2月3日が22, 1989年10月1日は24であった。点線はベースラインを示している。正の変動は北向きを, 負の変動は南向きを表す。1989年10月1日は1300~1930 UTのあいだに二つの negative bay (負の湾型変化) が, 1200~1800 UT に positive bay (正の湾型変化) がみられる。1990年2月3日には, 0000~0300 UT と 2130~2400 UT に negative bay が, 1400~1830 UT に positive bay がみられる。そしてその変動の時間的変化や各時刻の変動量は, どちらもよい共役性を示している。

図1c, dは夏, 冬期における  $H$  成分の典型的な日変化の例である。Syowa の  $\Sigma K$  指数は1990年8月20日は21, 1989年12月30日は26であった。午後側の positive bay に特徴的な非共役性がみられる。8月20日(図1c)の1200~2230 UT にみられる positive bay は, 夏季である Aedey で変動量が大きく, 冬季である Syowa では小さい。そして12月30日(図1d)の1100~1830 UT の positive bay では逆に, 変動量が夏季の Syowa で大きく冬季の Aedey で小さい。つまり夏半球側のほうが冬半球側より positive の変動量が多い。一方 negative の変動は夏期にも冬期にも Syowa の方が変動量が少し大きいようにみられる。(bay-type の変動に限らず統計をとっているため, 本論文では 'bay' という表現を用いず, 'positive の変動', または 'negative の変動' と表現する。)

Syowa と Aedey の変動量の相関図を図2に示す。横軸は Aedey, 縦軸は Syowa の変動量(nT)を各々表す。1990年6月と1989年12月の  $\Sigma K$  指数が20~30の日について10分間

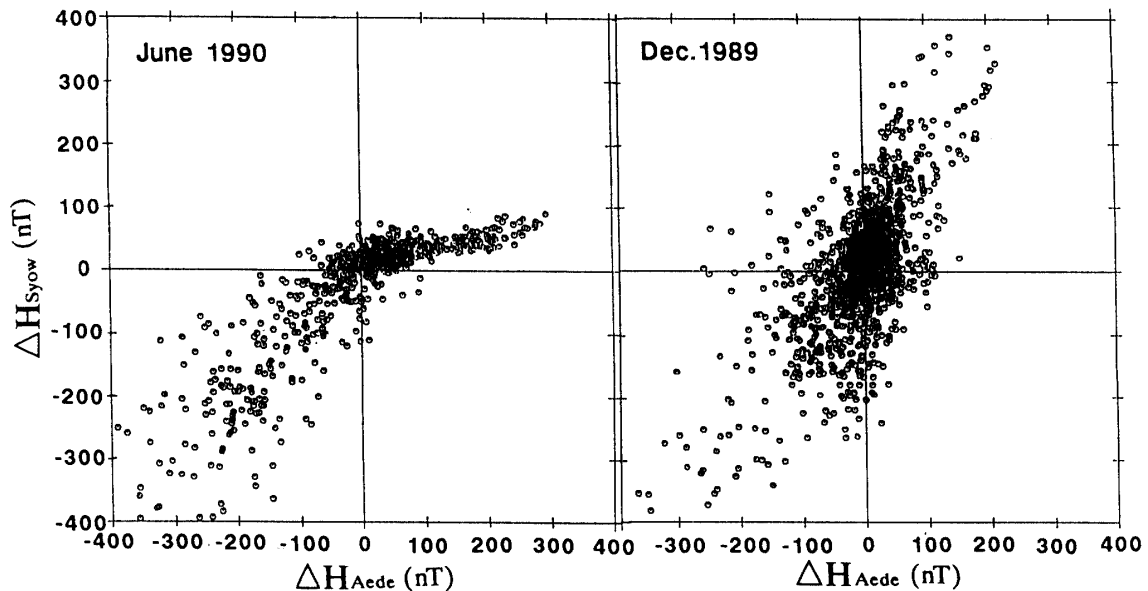


図2 Syowa と Aedey における地磁気変動量の相関図。1989年12月と1990年6月の Syowa の  $\Sigma K$  指数が20~30の日について各々プロットしている。

Fig. 2. Scatter plots showing the correlation of the magnitude of magnetic field variations between Syowa and Aedey in December 1989 and June 1990. In these panels, data are presented for the days of medium activity ( $\Sigma K$ -index indicated from 20 to 30).

平均値をプロットしたものである。特に positive の変動量に季節変化が顕著にみられた。12 月には  $\Delta H_{AE} = 0.47 \cdot \Delta H_{SY}$  であったが、6 月には  $\Delta H_{AE} = 2.95 \cdot \Delta H_{SY}$  になっている。Negative の変動の場合には 12 月と 6 月の傾きは各々  $\Delta H_{AE} = 0.72 \cdot \Delta H_{SY}$  と  $\Delta H_{AE} = 1.03 \cdot \Delta H_{SY}$  で positive の変動ほど大きな季節変化はみられない。このような positive の変動と negative の変動では、季節による特性が異なる。

$\Delta H_{SY}$  と  $\Delta H_{AE}$  の比の日変化を統計的にみるために、各時刻の変動量比を各月について平均を行った。図 3 に 1989 年 10 月、12 月と 1990 年 2 月、6 月の 1 カ月間の値を示す。横軸は世界時 (UT) で 0000~2400 UT の 24 時間である。縦軸は  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$  の値を示している。点線は  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE} = 1$  を示す。図の上半分は  $\Delta H_{SY}$  と  $\Delta H_{AE}$  がともに正の場合、下半分はともに負の場合である。 $\Delta H_{SY}$  と  $\Delta H_{AE}$  の符号が異なる場合は除いている。この図では、positive の変動と negative の変動の一般的な特性を知るために、静穏日と擾乱日を除いた  $\Sigma K$  が 20~30 の日について平均を行っている。これは Syowa の  $\Sigma K$  が 25 前後の日には、negative bay と positive bay がある程度発達するという経験に基づいている。

この図からも、positive の変動と negative の変動の季節による特性が大きく異なること

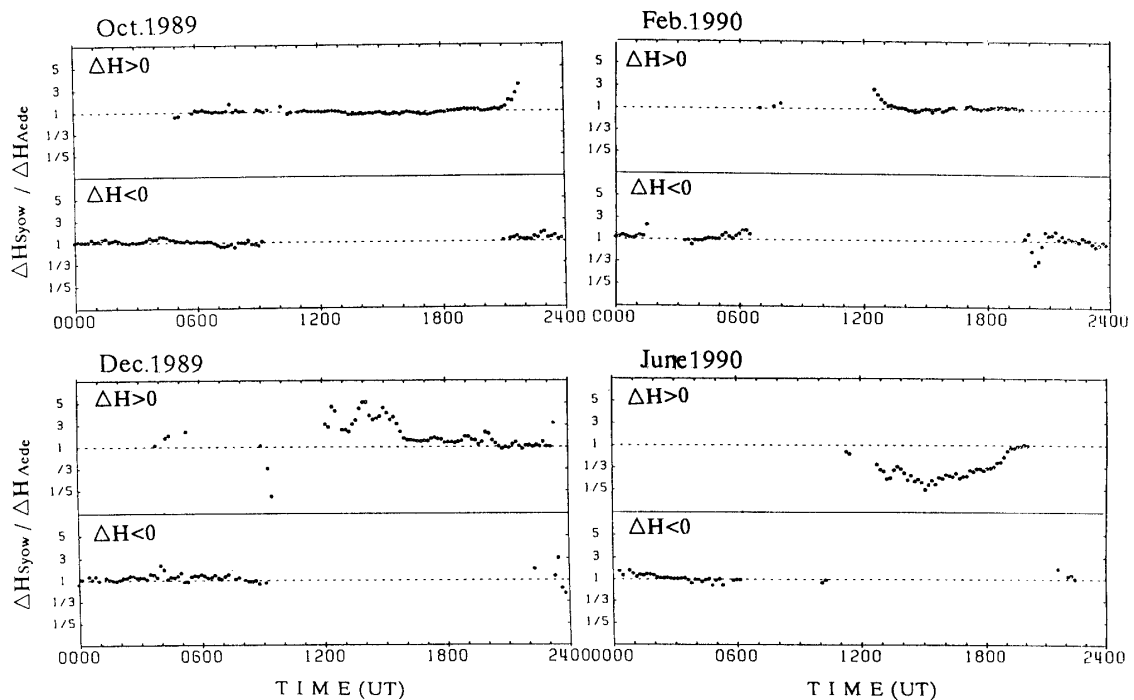


図 3 Syowa と Aedey の地磁気変動量比 ( $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$ ) の日変化。各月の  $\Sigma K$  指数が 20~30 の日について平均を行っている。上図は両観測点の変動量が共に正の場合、下図は共に負の場合である。

Fig. 3. Diurnal variations of the magnitude ratio,  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$ .  $\Delta H$  values for both observatories are the monthly mean values for days of  $\Sigma K$ -index from 20 to 30. The upper and the lower panels show positive and negative variations, respectively.



がわかる。Positive の変動は秋期の 1989 年 10 月と春期の 1990 年 2 月には、時刻によらず  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$  はほぼ 1 になっている。しかし夏期の 1990 年 6 月には、1230~1900 UT に  $\Delta H_{AE}$  が  $\Delta H_{SY}$  より大きくなり、 $\Delta H_{SY}$  は  $\Delta H_{AE}$  の 1/5~1/4 倍ほどになる。そして 1830~1900 UT に  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$  の値は急に大きくなり、1900~2000 UT にはほぼ 1 になる。一方冬期の 1989 年 12 月は、1200~1500 UT に  $\Delta H_{SY}$  が  $\Delta H_{AE}$  より大きく、 $\Delta H_{SY}$  は  $\Delta H_{AE}$  の 3~5 倍程度になる。そして 1500~1600 UT に急速に  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$  の値は小さくなり、1600~2300 UT にはほぼ 1 になる。

Negative の変動は変動量比が時刻によって変化せず、また季節によらず変動量は等しくなる。また図から positive の変動では変動量比は UT によって季節特性が異なることがわかった。しかも Aedey の夏季と Syowa の夏季では変動量比の日変化が対称的にはなっていない。このことは、季節変化を示す時間帯が共役点で必ずしも一致していないことを示している。

### 3.2. UT による地磁気変動量比の季節変化

3.1 章の解析により、時刻 (UT) によって季節変化が異なることがわかった。そこで、各時刻における  $\Delta H_{SY}$  と  $\Delta H_{AE}$  の比の季節変化を調べた (図 4)。横軸は月で解析期間の 13 カ月、縦軸は変動量比  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$  を、上から世界時が 0100~2400 UT の各時刻での  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE} = 1$  の目盛りを表す。そして、上に一目盛ごとに値が 3, 5 と増え、下に行くと 1/3, 1/5 となる。図 4a が positive の変動で図 4b が negative の変動についてである。データは各時刻の比を 1 時間平均にして、さらに各月の  $\Sigma K$  が 20~30 の日について平均している。図 4 でプロットがない月、時間帯があるのは、positive の変動と negative の変動に UT 依存性があることと、さらに K 指数に UT 依存性があるためである。

図 4 から以下のようなことが言える。

#### (1) Positive の変動

1100~2000 UT にはっきりした季節変化がみられる。 $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$  の値が夏期に最も小さくなり、冬期に最も大きくなる。夏期の  $\Delta H_{AE} / \Delta H_{SY}$  の値が冬期の  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$  よりかなり大きいことが特徴的である。夏期には 1700 UT 頃に  $\Delta H_{AE}$  が  $\Delta H_{SY}$  の最大 5 倍までになり、冬期には 1300 UT 頃に  $\Delta H_{SY}$  が  $\Delta H_{AE}$  の最大 3 倍ほどになる。そして 2 月と 10 月の 1800 UT 頃に  $\Delta H_{SY}$  と  $\Delta H_{AE}$  の大きさが等しくなる。0000~1000 UT と 2100~2400 UT はデータの分布が少ないために特性を読むことが出来ない。

#### (2) Negative の変動

Positive の変動のような季節変化がみられず、夜中から朝方 (0000~0500 UT, 2300~2400 UT) にかけて、季節によらず  $\Delta H_{SY}$  と  $\Delta H_{AE}$  は同じくらいか、 $\Delta H_{SY}$  の方が 1.5 倍ほど大きくなっている。

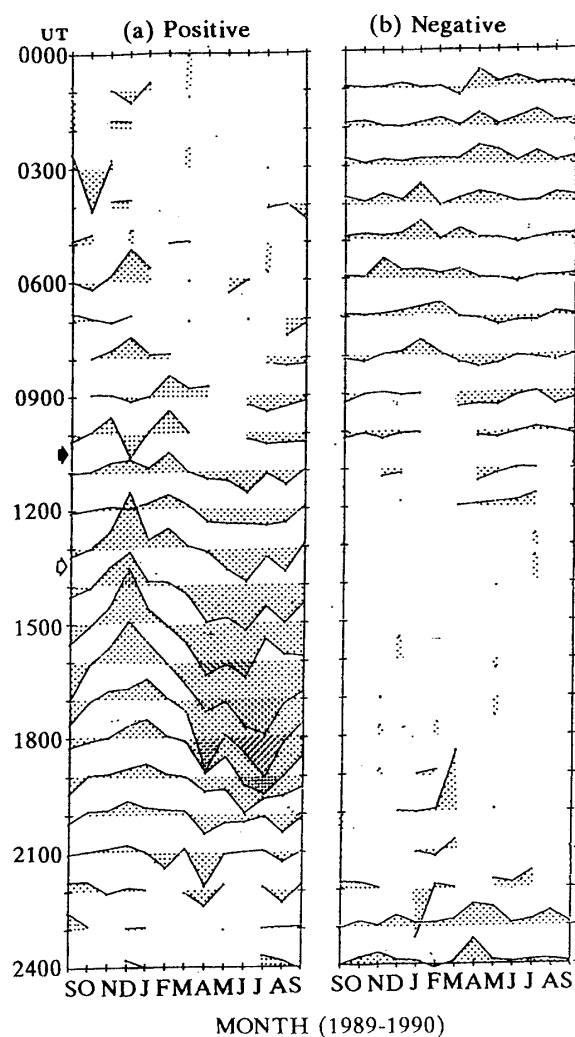


図4 各 UT における地磁気変動量比 ( $\Delta H_{SY}/\Delta H_{AE}$ ) の月変化. (a) と (b) は各々 positive の変動と negative の変動についてである. 白抜きの矢印と黒の矢印は各々, Syowa と Aedey の地理的 地方時の正午を示す.

Fig. 4. Diurnal variations of the magnitude ratio, ( $\Delta H_{SY}/\Delta H_{AE}$ ) for thirteen months from September 1989 to September 1990.  $\Delta H$  is the monthly mean value for days of  $\Sigma K$ -index from 20 to 30. Panels (a) and (b) show positive and negative variations, respectively. The white and black arrows indicate the geographic local noon at Syowa and Aedey, respectively.

### 3.3. 磁気活動度による特性

3.2 章の解析では,  $\Sigma K$  が 20~30 の日について平均を行っていた. このため同時刻で  $K$  指数がいろいろの場合, つまり静穏時も擾乱時も一緒に平均してしまっていた. そのため, 地磁気擾乱が生じているときと静穏時とで, 共役点において地磁気変動量の比にどのような変化があるのかを知ることは出来ない. そこで, 地磁気活動度による分類を行った.

図5と図6は Syowa における  $K$  指数を用いて磁気活動度を3段階に分けたものである.

図 5a, b, c は positive の変動について、各々 Syowa の  $K$  指数が 0, 1, 2 の場合、3, 4 の場合、5, 6, 7 の場合である。図 6a, b, c は negative の変動について図 5 と同様の図である。

図 5, 図 6 から以下のようなことがわかる。

(1) Positive の変動

基本的な季節変化は図 4 と変わらないが図 6a にみられるように、静穏時 ( $K = 0, 1, 2$ ) に 1200~2100 UT の夏期と冬期の比の大きさの差がさらに大きくなった。夏期には 1100~2100 UT に  $\Delta H_{AE}$  が  $\Delta H_{SY}$  より大きく、特に 1300 UT 頃から急速に  $\Delta H_{AE} / \Delta H_{SY}$  の値が大きくなり、1800 UT に最大で 5.2 にまでなる。一方冬期には 1200~1900 UT に  $\Delta H_{SY}$  が  $\Delta H_{AE}$  より大きく、最大でも  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE} = 2.7$  程度である。そしてその値は時刻に

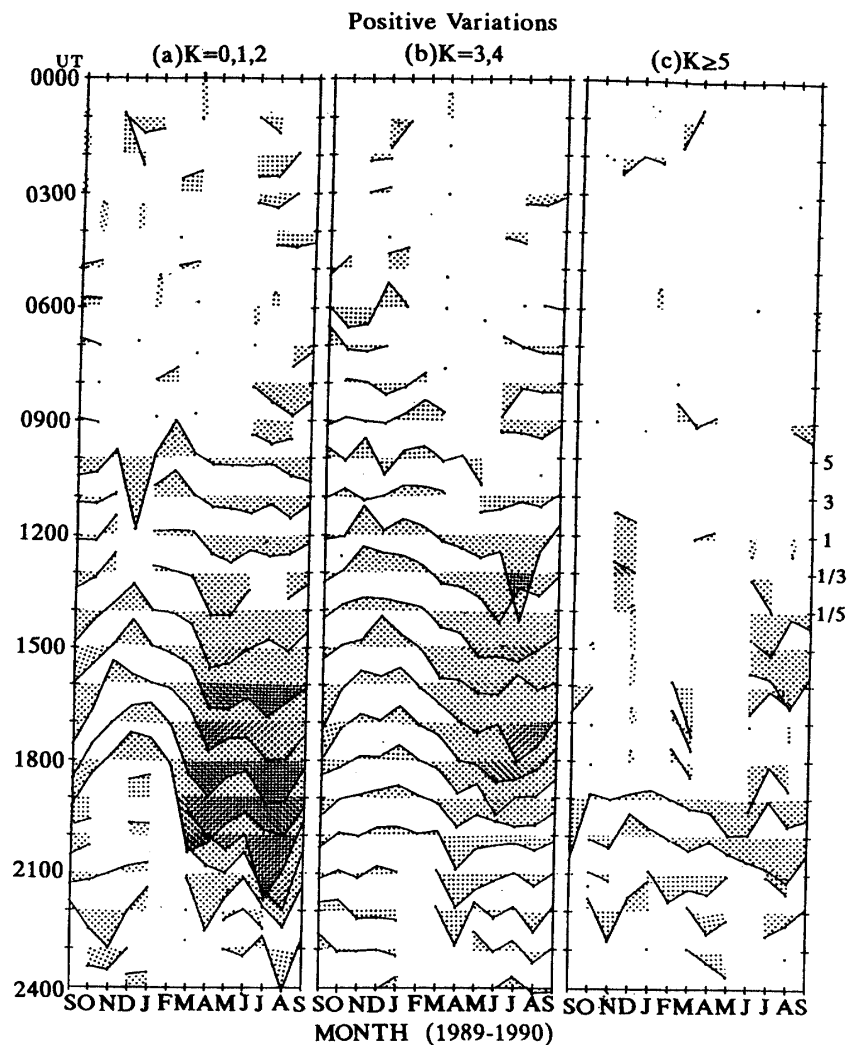


図 5 Positive の変動について図 4 と同様。Syowa の  $K$  指数によって分類。 $K$  指数: (a) 0, 1, 2, (b) 3, 4, (c) 5 以上。

Fig. 5. Dependence on the geomagnetic activity index ( $K$ ) for the magnitude of positive variations. Data given in Fig. 4 are sorted depending on the  $K$ -index: (a) 0, 1, 2 and (b) 3, 4 and (c) over 5.

よってほとんど変化しない。ところが、地磁気活動度が大きくなるに従って、夏期の 1400 ~ 2100 UT において  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$  の値が小さくなっている。そして、逆に冬期の 1100 ~ 1600 UT には、地磁気活動度とともに  $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$  の値は大きくなっている。つまり、地磁気活動度が大きくなると、相対的に  $\Delta H_{AE}$  が小さくなり、 $\Delta H_{SY}$  が大きくなる。

## (2) Negative の変動

地磁気活動度で分類することによって、静穏時 ( $K = 0, 1, 2$ ) には季節による変化があることがわかった。Positive の変動と同様に夏期に  $\Delta H_{AE}$  の方が大きく、冬期には  $\Delta H_{SY}$  の方が大きくなる。0500 ~ 0800 UT では 4 月と 8 月頃に  $\Delta H_{SY}$  と  $\Delta H_{AE}$  の大きさが等しくなる。しかし、地磁気活動度が大きくなると、このような季節変化がほとんど見られなくなり、季節を通じて常に  $\Delta H_{SY}$  の方が 1.0 ~ 1.5 倍ほど大きくなっている。

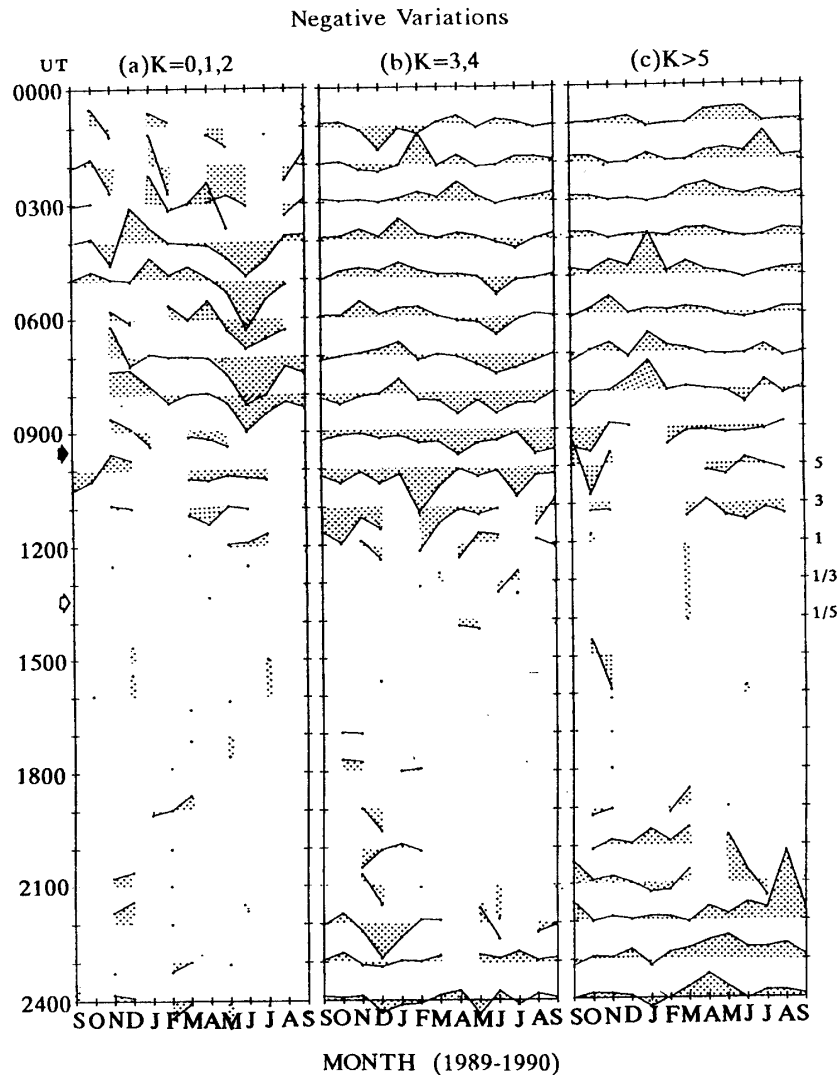


図 6 Negative の変動について図 5 と同様。

Fig. 6. Same as Fig. 5 for negative variations.

#### 4. 考 察

地上で観測される地磁気変動は電離層電流によって生じる。そしてその電離層電流の大きさは電離層の電気伝導度に大きく依存しているため、地磁気変動も電離層の電気伝導度の影響を受ける。表 1 に示すように、Syowa と Aedey では電離層における条件が違う。それら条件の違いが電離層電流に非共役性を生じさせていると予想される。擾乱時にはオーロラ粒子の降り込みにより電離層の電気伝導度が上がるため、日照の条件の違いによる効果を知るには静穏時の解析結果について考察しなければならない。

解析結果得られた特性を静穏時と擾乱時に分けてまとめてみると、以下のようになる。

##### (a) 静穏時

- (1) Positive の変動も negative の変動も、夏半球側が冬半球側より地磁気変動量が大きい。
- (2)  $\Delta H_{SY}$  と  $\Delta H_{AE}$  が等しくなる時期が、春分と秋分の時期からずれている。

positive の変動 (1500~1800 UT 頃) → 2 月, 10 月

negative の変動 (0500~0800 UT 頃) → 4 月, 8 月

- (3)  $\Delta H_{SY}$  と  $\Delta H_{AE}$  の比の最大値は冬期より夏期のほうが大きくなる。

		positive	negative
夏期	$\Delta H_{AE} / \Delta H_{SY}$	→ 4.8	3.0
冬期	$\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$	→ 2.6	1.5

- (4) Positive の変動は夏期の 1800 UT 頃に比 ( $\Delta H_{AE} / \Delta H_{SY}$ ) が最も大きくなる。
- (5) Negative の変動は positive の変動より共役点間の変動量の比が全般に小さい。

##### (b) 擾乱時

- (1) Negative の変動も positive の変動も、地磁気活動度が大きくなると相対的に  $\Delta H_{SY}$  が大きくなる。
- (2) Positive の変動は静穏時と同じセンスの変動量比の季節変化が残っている。
- (3) Negative の変動は季節に関わらず、 $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE} = 1 \sim 1.5$  で  $\Delta H_{SY}$  が  $\Delta H_{AE}$  より大きい。
- (4) Negative の変動は、変動量比に季節変化がみられなくなる。

これらの統計的特性について、考察を以下に述べる。

#### 4.1. 日照条件による効果

Syowa と Aedey の日照の条件の違いは、

- (1) 共役点観測点が各々南・北半球にある、
- (2) 地理的地方時が 4 時間、Syowa の方が早い、
- (3) 地理緯度が Syowa の方が 5° 高緯度に位置する、

の3点から生じている。

Positiveの変動量が冬半球より夏半球で大きくなることは、初期の研究と一致している。本論文では特に、 $S_q$ 電流の成分を差し引いた後の地磁気変動量にも日照条件の変化によると思われる季節変化が見られることが明らかになった。Positiveの変動の特性に特に顕著である。日照があると、太陽からの紫外線により電離層の電離度が上昇し、電離層の電気伝導度が大きくなる。夏季には冬季より太陽高度が高いため、日照の効果が大きくなり、夏半球側では冬半球側より電離層電流が大きくなる。このため、地磁気変動量も夏半球側で大きくなると考えられる (NAGATA and KOKUBUN, 1960; WESCOTT and MATHER, 1965; KOKUBUN, 1965; MENG and AKASOFU, 1968; 他)。

本解析の結果ではさらに、夏期(Aedeyの夏季)と冬期(Syowaの夏季)では、午後から夕方のpositiveの変動の比が大きく違うことが明らかになった。これはSyowaとAedeyの地理緯度の違いによると考えられる。図7はSyowaとAedeyの電離層における日照時間とその月変化を示したものである。横軸が世界時(UT)で縦軸が12カ月を表す。この図にみられ

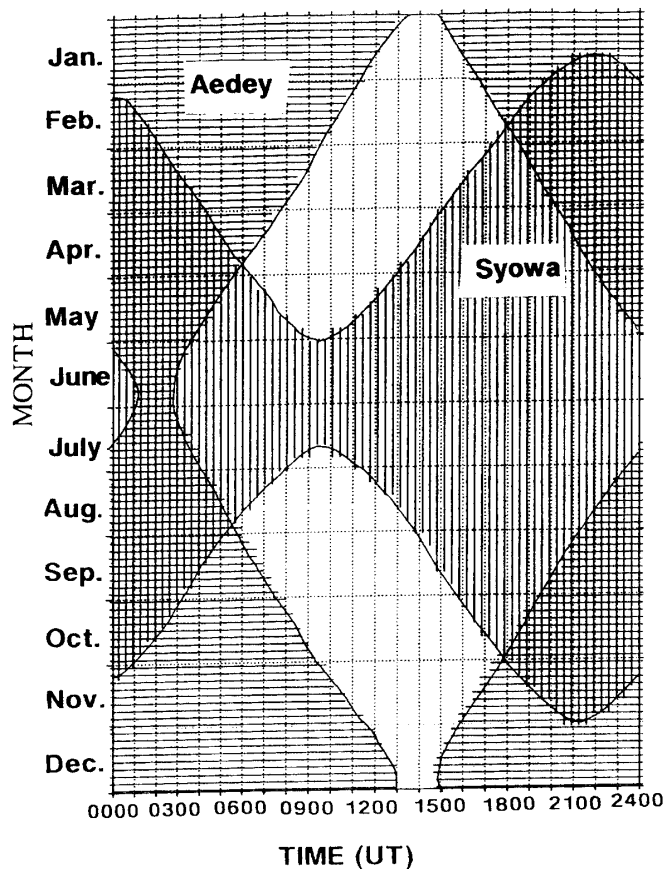


図7 SyowaとAedeyにおける日照時間の季節変化。縦線と横線の部分は各々SyowaとAedeyの夜を示す。

Fig. 7. The seasonal variations of sunshine at Syowa and Aedey. Vertical and lateral striped patterns show the dark at Syowa and Aedey, respectively.

るように、夏期の5月の終り頃から7月の終りまでは Syowa では日照がない。一方、冬期の11月の半ばから1月の終りまでは、Adey にもわずかに日照がある。つまり両観測点における日照条件の差が夏期と冬期では異なる。このことは夏期と冬期の両観測点における太陽天頂角の差を比較するとさらに明らかである。

図8は両観測点の太陽高度角の差の日変化、及び年変化を示したものである。太陽高度角

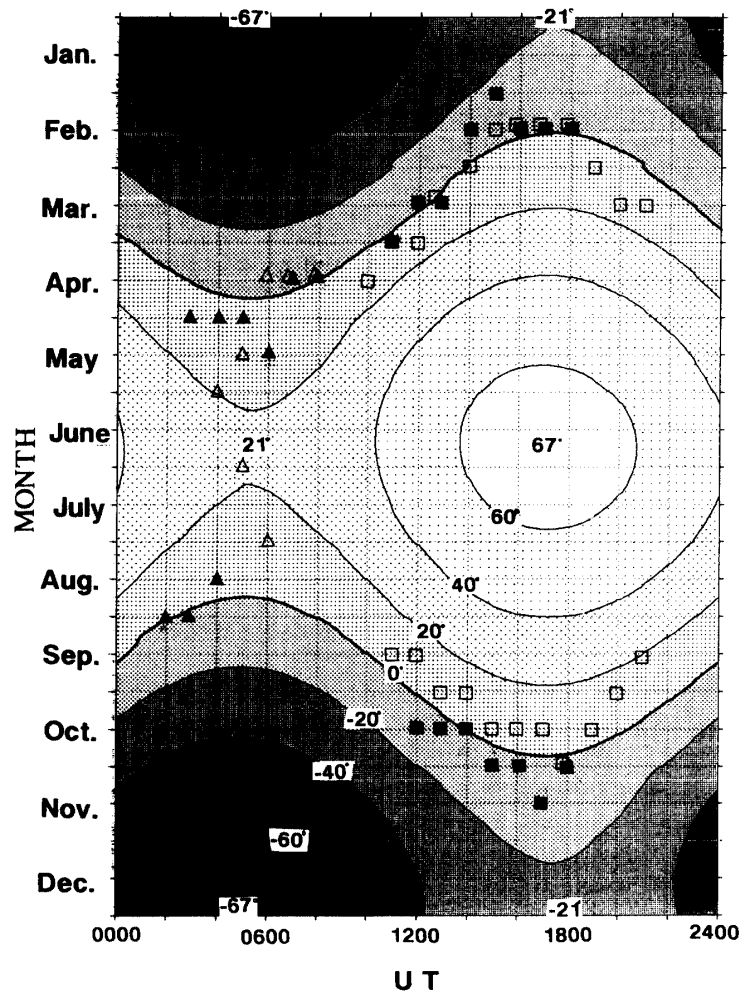


図8 Syowa と Adey おける太陽天頂角の差の季節変化。■, ▲, □, △は各々,  $K$  指数が 0, 1, 2 のときの positive の変動, negative の変動,  $K$  指数が 3, 4 のときの positive の変動, negative の変動において両観測点の地磁気変動量が等しくなる時期を示す。

Fig. 8. Seasonal variations of the difference of solar zenith angles between at Syowa and at Adey. Four different symbols indicate the time when the magnitude of the magnetic deviations at two observatories is the same under the following conditions:

- : for positive variation under  $K$ -index: 0, 1, 2
- ▲ : for negative variation under  $K$ -index: 0, 1, 2
- : for positive variation under  $K$ -index: 3, 4
- △ : for negative variation under  $K$ -index: 3, 4

の差 $\phi$ は Aedey と Syowa の太陽天頂角(各々 $\phi_{AE}$ ,  $\phi_{SY}$ )の差  $\phi = \phi_{AE} - \phi_{SY}$  で定義する。太実線は両観測点の太陽高度角が等しい場合、即ち $\phi = 0^\circ$ を表している。図 8 から夏期の 1600~1800 UT 頃に $\phi$ の値は最大  $67^\circ$ にまでになることがわかる。一方冬期の 1600~1800 UT 頃ではせいぜい $\phi = -21^\circ$ である。つまり、両観測点における電離層の電気伝導度の差は、夏期のほうが大きい。そのため、Syowa の夏季より Aedey の夏季のほうが両観測点における地磁気変動量の差が大きくなると説明できる。

また、positive の変動の変動量比は夏期の 1800 UT 前後に最大になる。このことも図 8 の $\phi$ の値が最大になる時期と一致している。一方、夜中から午前にかけては午後の時間帯とは逆に夏期に $\phi = 21^\circ$ 、冬期に $\phi = -66^\circ$ になる。しかし図 5 で示したように、negative の変動については、positive の変動ほどはっきりした太陽高度角差の依存性はみられない。

一方、図 7 からわかるように、両観測点で日照の始まる時刻及び、日照の終わる時刻が一致する時期は春、秋分からずれている。2 月と 10 月の 1800 UT 頃と 4 月と 8 月の 0600 UT 頃である。これは両観測点の地方時が 4 時間ずれていることによって生じている。これらの時期は、解析による $\Delta H_{SY}$  と $\Delta H_{AE}$  が等しくなる時期とよく一致している。そこでさらに、各時刻において $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE}$  が 1 となる時期を図 8 に■, □, ▲, △のプロットで表す。Positive の変動では 1000~1900 UT に $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE} = 1$  になる時刻、及び月が $\phi = 0^\circ$ の線とよく一致している。そして negative の変動の場合も 0200~0800 UT の静穏時には $\phi = 0^\circ$ の線にかなり近いといえる。

また、positive の変動の 1900 UT 以降と、negative の変動の  $K$  指数が 3, 4 の場合に $\Delta H_{SY} / \Delta H_{AE} = 1$  になる時期が $\phi = 0^\circ$ の線からかなりずれてしまっている。これらは 1900 UT 以降には positive bay はあまり見られないため、統計的に精度がよくないということと、negative の変動は磁気活動度が大きくなるとともに日照の効果よりもオーロラ粒子の降り込みによる効果の方が大きくなるためであると考えられる。

以上から、静穏時の negative の変動と positive の変動はともに、 $\Delta H_{SY}$  と $\Delta H_{AE}$  が等しくなる時刻、及び月が太陽高度角 $\phi_{AE}$  と $\phi_{SY}$  が等しくなる時刻、月によく一致しており、日照時刻が地磁気変動量に非常に大きな影響を及ぼしているといえる。また、日照による効果は negative の変動に比べて、positive の変動で非常に顕著である。

KAMIDE and FUKUSHIMA (1972) は、時間的に孤立した positive bay の場合には変動量に季節変化はみられないという結果を示した。本解析では、すべて各月の静穏時のレベルを基準線とし、統計的な解析を行っている。この方法では、 $S_q$  成分の季節変化は分離できていると考えられる。しかし、時間的に接近して連続的に bay-type の変動が生じている場合も区別していない。そのため今後、さらに単一の bay-type の変動の分類を行ってみる必要がある。



#### 4.2. 地磁気活動度による効果

極域の地磁気の変動現象は、オーロラオーバルに沿って電離圏を流れるオーロラジェット電流によって起こされている。擾乱時には、オーロラ粒子がオーロラオーバル付近の電離層に降り込んでくる。そのため電離層の電離度が上昇し、電気伝導度が大きくなる。したがって擾乱時には日照の効果以外にこのようなオーロラ粒子の降り込みによる効果の影響も地上の地磁気変動にも現れると考えられる。

電離層に降り込んでくる粒子の量は極域で一様ではなく、MLT、磁気緯度などによって異なる。しかし、ここでは Syowa と Aedey がよい地磁気共役点であると言えるため、最も影響を及ぼしているのは両観測点のミラー高度の違いであると考えられる。Syowa と Aedey は固有磁場の強度が違う(表 1)。Aedey のほうが固有磁場が強いため、ミラー高度は Aedey のほうが高く、電離層高度まで降り込んでくるオーロラ粒子の量は Syowa 側に比べて少ないと考えられる。すなわち、擾乱時には Syowa 側の電離層の方が粒子の降り込みによる効果が大きいと予想される。このことは、 $\Delta H_{AE}$  と  $\Delta H_{SY}$  の比に日照の効果とは逆の効果とを及ぼす。

以上のことから、擾乱時にはオーロラ粒子の降り込みによる効果が大きくなり、日照の効果打ち消すセンスにあるといえる。

また擾乱時には、両観測点の磁気共役点がお互いに大きく離れてしまう可能性も考えなければならない。磁気擾乱時に共役点がずれてしまうことにより、両観測点の地磁気変動の相関がまるでなくなってしまうようでは、上述のような解釈も難しくなる。本解析により、10月と2月に両観測点における日照条件の効果の差異が最も小さいことがわかった。そこでこれらの月について、両観測点の地磁気変動量の相関係数を調べた。200~800 nT の変動について相関係数は10月が0.7319、2月が0.8323で、よい相関関係にあるといえる。擾乱時の地磁気変動は~800 nT 程度がほとんどであるため、擾乱時に生じる両観測点の共役点のずれは本研究において地磁気変動量を比較する上でそれほど大きくないと考えられる。

### 5. 結 論

南極の Syowa とアイスランドの Aedey の地磁気共役点において、同時に観測された地磁気の  $H$  成分を1989年9月~1990年9月の13カ月にわたって解析を行った。その結果から、両観測点の同時刻における地磁気変動量の比の日変化、季節変化や地磁気活動度による統計的特性の詳細が得られた。そして季節や観測点による日照条件の違いが極域電離層電流に非常に大きな影響を与えていることが明らかになった。

これらの特性のうち静穏時における特性は、negative の変動も positive の変動も共に日照による電離層の電離効率の違いと定性的に非常によい一致を示すことが明らかになった。共役点におけるこの日照条件(太陽高度、日照時間)の差異は、Syowa が Aedey より地理緯

度が約 5°高緯度側に位置すること、地方時が約 4 時間進んでいることなどによって生ずる。

擾乱に伴う特性は、電離層高度まで降り込むオーロラ粒子による電離が要因となる。解析結果は降り込み粒子の量が Aedey より Syowa で多いことを意味し、Aedey が Syowa よりミラー高度が高いという事実と一致している。日照効果と擾乱に伴うオーロラ粒子の降り込みによる効果がお互いに打ち消し合うセンスにあり、午後から夜中にかけて現れる positive の変動では日照による効果の方が大きく、夜中から朝方に現れる negative の変動では擾乱が大きくなると日照による特性がほぼ打ち消されて粒子の降り込みによる効果が大きくなっている。

## 謝 辞

アイスランドの地磁気観測にご支援頂いたアイスランド大学の Th. SAEMUNDSSON 教授、南極昭和基地において地磁気観測を行った第 30 次、第 31 次南極観測越冬隊の方々に感謝いたします。本研究に対し有益なご指導およびご助言を与えてくださった平澤威男先生、江尻全機先生、国分征先生、上出洋介先生、家森俊彦先生、そして国立極地研究所の超高層部門の方々に深く感謝いたします。

## 文 献

- KAMIDE, Y. and FUKUSIMA, N. (1972): Positive magnetic bays in evening high-latitudes and their possible connection with partial ring current. Rep. Ionos. Space Res. Jpn., **26**, 79–101.
- KOKUBUN, S. (1965): Dynamic behaviour and north-south conjugacy of geomagnetic bays. Rep. Ionos. Space Res. Jpn., **19**, 177–200.
- MENG, C.-I. and AKASOFU, S.-I. (1968): Polar magnetic substorms in the conjugate areas. Radio Sci., **3**, 751–757.
- NAGATA, T. and KOKUBUN, S. (1960): On the earth storms IV. Polar magnetic storms, with special reference to relation between geomagnetic disturbances in the northern and southern auroral zones. Rep. Ionos. Space Res. Jpn., **14**, 273–290.
- NAGATA, T. and KOKUBUN, S. (1962): An additional geomagnetic daily variation field ( $S_q^p$ -field) in the polar region on geomagnetically quiet days. Rep. Ionos. Space Res. Jpn., **16**, 256–274.
- NAGATA, T., KOKUBUN, S. and IJIMA, T. (1966): Geomagnetically conjugate relationship of polar geomagnetic disturbances. Particularly the distinct geomagnetic conjugacy between Syowa Station in Antarctica and Reykjavik in Iceland. JARE Sci. Rep., Ser. A, **3**, 1–64.
- WESCOTT, E.M. (1961): Magnetic variations at conjugate points. J. Geophys. Res., **66**, 1789–1792.
- WESCOTT, E.M. and MATHER, K.B. (1965): Magnetic conjugacy from  $L = 6$  to  $L = 1.4$ , 1. Auroral zone: Conjugate area, seasonal variations, and magnetic coherence. J. Geophys. Res., **70**, 29–42.
- (1992 年 10 月 23 日受付 ; 1992 年 12 月 24 日改訂稿受理)